

УДК 621.7:62 – 192:669.02/09

Гулаков С.В.<sup>1</sup>, Щербаков С.В.<sup>2</sup>, Заварика Н.Г.<sup>3</sup>**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА**

*Рассмотрена технология изготовления бандажированных изделий с использованием локального источника нагрева. Создана математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния элементов составных конструкций.*

Ко многим деталям машин и инструменту, работающим в сложных условиях эксплуатации, предъявляется ряд требований, порой альтернативных, выполнение которых позволяет обеспечить необходимый комплекс эксплуатационных характеристик.

Одним из путей решения указанных проблем является изготовление узлов в виде составных изделий. К таким изделиям относятся бандажированные прокатные валки, колеса, предохранительные устройства и другие [1, 2].

В промышленности наибольшее распространение получили приемы фиксации сопрягаемых элементов составных конструкций за счет гарантированно натяга (прессовые соединения, посадки за счет изменения размеров сопрягаемых элементов при нагреве или охлаждении). Эти способы фиксации характеризуются высокими требованиями к точности геометрических размеров сопрягаемых поверхностей, к качеству их обработки, высокими энергозатратами, трудностью обеспечения условий равномерного натяга, особенно для длинномерных и крупногабаритных изделий. Часто термическое воздействие, сопутствующее посадке бандажа на ось, отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках составных изделий из-за изменения свойств металла.

В Приазовском государственном техническом университете разработана технология изготовления составных изделий с применением локального нагрева: сваркой, наплавкой, плазменной, газопламенной обработкой, когда в обрабатываемых изделиях возникают термические напряжения, приводящие к деформации последних. Авторами предложены конструкции составных деталей машин и инструмента, в которых сопрягаемые элементы фиксируются друг относительно друга за счет таких деформаций [2].

Суть метода заключается в том, что при наплавке или локальной термической обработке концентрированным источником тепла по кольцевой траектории поверхности цилиндрического тела сварочные напряжения приводят к деформации цилиндра – уменьшению его диаметра.

Условия и режимы наплавки или локальной термической обработки, количество наплавленных валиков, порядок их наложения, форма обрабатываемого изделия и другое оказывают существенное влияние на характер и величину напряженно-деформированного состояния.

С целью усовершенствования технологии изготовления составных изделий необходимо иметь представление о распределении сварочных напряжений в рассматриваемой зоне сопряжения и о характере их изменения, что и является предметом исследования. Экспериментальное определение указанных параметров связано с рядом технических трудностей, временными и финансовыми затратами. Моделирование деформаций, напряжений и радиальных смещений оси сварки кольцевого шва за счет действия локального источника тепла может быть произведено с использованием зависимостей (1 – 5) [3]:

---

<sup>1</sup> ПГТУ, д-р техн. наук, профессор

<sup>2</sup> ПГТУ, аспирант

<sup>3</sup> ПГТУ, ст. научн. сотрудник

$$\Delta R = \frac{2\varepsilon_s R}{1 + \frac{4}{r^4 y_0^4}} \left\{ \left[ \left( \frac{1}{2y_0} + \frac{2}{r^3 y_0^3} \right) \sin ry + \left( \frac{2}{r^3 y_0^3} - \frac{1}{ry_0} \right) \cos ry \right] e^{-ry} + e^{-\frac{2y}{y_0}} \right\}, \quad (1)$$

$$r = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{R^2 \delta^2}} = \frac{1,28}{\sqrt{R \cdot \delta}}, \quad (2) \quad \Delta R_\beta = \frac{\beta_0}{4r} (-\sin ry + \cos ry) \cdot e^{-ry}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{oc}(y) = \varepsilon_\delta(y) + \varepsilon_{yn}(y), \quad (4) \quad \varepsilon_\delta(y) = \frac{\Delta R}{R}, \quad \varepsilon_{yn}(y) = \frac{\sigma}{E}, \quad (5)$$

где  $\Delta R$  – деформации от продольного укорочения, см;  
 $\Delta R_\beta$  – радиальные перемещения от угловых деформаций, см;  
 $R$  – радиус кольцевой оболочки, см;  
 $y_0$  – ширина зоны пластических деформаций в одну сторону от шва, см;  
 $\varepsilon_s$  – относительная деформация, соответствующая пределу текучести металла;  
 $\varepsilon_\delta$  – действительные тангенциальные деформации;  
 $\varepsilon_{yn}$  – упругие деформации, соответствующие тангенциальным напряжениям;  
 $\varepsilon_{oc}$  – тангенциальные остаточные пластические деформации упругости.  
 $\sigma$  – тангенциальные напряжения, кгс/см<sup>2</sup>;  
 $E$  – модуль упругости;  
 $\mu$  – коэффициент Пуассона;  
 $\delta$  – толщина оболочки, см;  
 $\beta_0$  – угловые деформации, вызванные сваркой стыковых соединений, рад;

Применение средств вычислительной техники дает возможность существенно упростить и оптимизировать по времени процесс вычислений с использованием предложенной методики. Программная реализация математической модели выполнена в виде графического многооконного приложения в среде Windows (см. рис. 1).

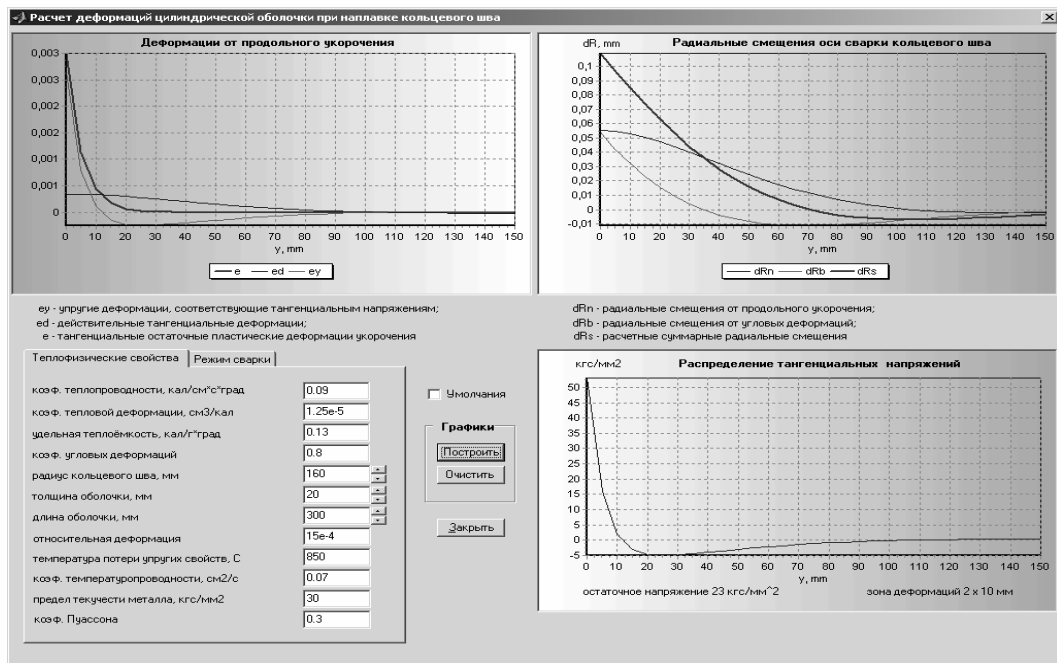


Рис. 1 – Интерфейс программы

Изменяя в режиме диалога теплофизические свойства материала изделия и параметры наплавки, на экране с учетом временного фактора можно получить экспериментальные и расчетные кривые распределения деформаций и напряжений по длине бандажа.

В окне приложения отображаются графики распределения деформаций, тангенциальных напряжений и радиальных смещений оси сварки по длине цилиндрической оболочки, а также панель для ввода (изменения) теплофизических свойств металла и режимов сварки.

Для проверки расчетных зависимостей проведены исследования по оценке остаточных напряжений и деформаций на моделях в виде колец, посаженных на ось с натягом, а также в свободном состоянии.

Эксперименты проводились с кольцами следующих размеров: наружный диаметр  $D_{н.м.} = 240$  мм, внутренний диаметр  $D_{в.м.} = 184,42$  мм, толщина кольца  $\delta_m = 27,7$  мм.

Режимы наплавки на модели: сварочный ток 100 А, напряжение дуги 30В, скорость наплавки 40 м/час, диаметр электродной проволоки – 2 мм, марка проволоки – Св-08Г2С, керамический флюс ЖСН - 5. Наплавка поверхностей колец осуществлялась в 2 слоя общей высотой 3,5 – 4 мм с предварительным подогревом до 360 – 450 °С. По окончании наплавки температура колец не превышала 380 – 400 °С.

В процессе экспериментов методом тензометрирования производились замеры остаточных напряжений и оценка характера изменения внутреннего диаметра. Результаты измерений тангенциальных остаточных сварочных напряжений в кольце (кривая 1), наплавленном в свободном состоянии (рис. 2), показали, что в наплавленном слое сформировались сжимающие остаточные напряжения, которые уравновешены растягивающими напряжениями в теле кольца.

Обычно при сварке углеродистых и низколегированных сталей в наплавленном металле

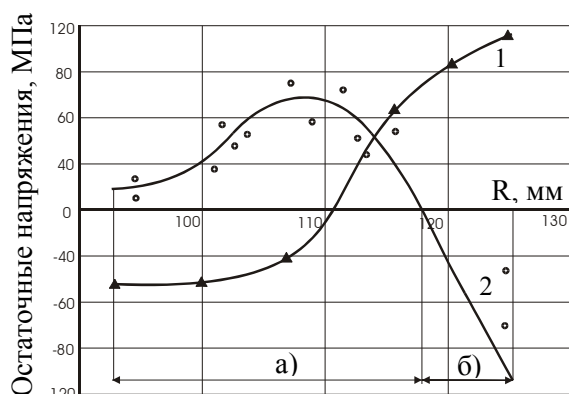


Рис.2 – Эпюры остаточных напряжений в кольце, наплавленном в свободном состоянии

а) толщина кольца, мм;

б) – толщина наплавленного металла, мм;

● – под флюсом ЖСН-5;

▲ – под флюсом АН-348А

возникают растягивающие остаточные напряжения, которые уравновешиваются в реактивной зоне сжимающимися напряжениями. Для сравнения с полученной эпюрой напряжений в кольце, наплавленном под флюсом ЖСН-5, была проведена наплавка на такое же кольцо и на тех же режимах под флюсом АН-348А. Как видно из рис. 2 (кривая 2), распределения тангенциальных остаточных напряжений по знаку носят обратный характер.

Причиной возникновения сжимающих остаточных напряжений в наплавленном слое может быть различие в коэффициентах температурного расширения наплавленного и основного металла, а также возможные структурные превращения. Данные исследований показали, что наплавленный металл под флюсом ЖСН-5 имеет мартенситную структуру. Как известно, перестройка кристаллической решетки при мартенситном превращении сопровождается увеличением объема.

Эпюра остаточных напряжений в кольце, посаженном с натягом на ось, представлена на рис. 3. Посадка кольца на ось осуществлялась после нагрева кольца до 250 °С. После остывания и обжатия кольцом оси, собранные детали нагревались до температуры 300 – 350 °С, а затем на поверхность кольца производилась наплавка. Как видно из рис. 3, эпюра тангенциальных остаточных напряжений в кольце, посаженном на ось с натягом, после наплавки повторяет характер эпюры в свободном кольце. В отличие от свободного, в напряженном кольце эпюры сжимающих и растягивающих напряжений не уравновешены. Причиной тому является реакция со стороны жесткой оси. Величина тангенциальных остаточных напряжений, вызванных наплавкой и не зависящих от состояния кольца, практически такая же, как и при наплавке на свободном кольце.

Кроме тангенциальных остаточных напряжений в кольце, посаженном на ось, производилось измерение радиальных напряжений (рис.3). Полученная эпюра радиальных напряжений в

кольце представляет собой эпюру суммарных напряжений, вызванных натягом кольца на ось до наплавки и натягом в результате усадки кольца после наплавки.

Измерения внутреннего диаметра до и после наплавки кольца в свободном состоянии показали усадку на 0,27 мм. Измерения производились в трех плоскостях под углом  $120^\circ$  и в трех точках в каждой плоскости. Значение усадки 0,27 мм получено как среднее значение из 9 измерений.

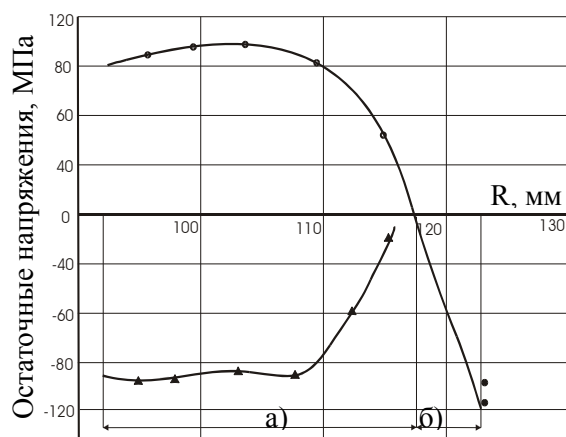


Рис. 3 - Эпюры остаточных напряжений в наплавленном кольце, посаженном с натягом на ось

а) – толщина кольца, мм;

б) – толщина наплавленного металла, мм;

▲ – радиальные напряжения;

● – тангенциальные напряжения

Используя эффект усадки, а также некоторые конструктивные элементы поверхности бандажа и оси можно надежно закрепить бандаж на оси любого тела вращения от поперечного смещения.

Предложенное научное направление позволяет наметить ряд перспективных путей его развития: упрощение технологии и снижение трудоемкости изготовления составных деталей и узлов механизмов, разработка методов восстановления рабочих поверхностей путем наплавки, изготовление предохранительных устройств.

### Выводы

1. Применение рассмотренных технологических вариантов бандажирования с использованием локального источника нагрева позволяет улучшить технологичность производства составных конструкций, повысить служебные характеристики и снизить затраты на их изготовление.
2. Методика математического моделирования дает возможность с достаточной точностью прогнозировать характер распределения остаточных напряжений и деформаций, рассчитывать регламентированные усилия фиксации бандажа на оси для обеспечения необходимого комплекса эксплуатационных характеристик.

### Перечень ссылок

1. Полухин В.П. Составной рабочий инструмент прокатных станов / В.П. Полухин, П.И. Полухин, В.А. Николаев. – М.: Металлургия, 1977. – 88 с.
2. Гулаков С.В. Соединение элементов бандажированных изделий применением локального нагрева / С.В. Гулаков, С.В. Щербаков, Н.Г. Заварика // Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Вип.5. – Маріуполь, 2000. – 305 с.
3. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций / С.А. Кузьминов. – Л.: Судостроение, 1974. – 288 с.
4. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
5. Полухин П.И. Производство крупных опорных валков и пути повышения их стойкости / П.И. Полухин, Г.А. Пименов, В.А. Николаев. – М.: НИИинформтяжмаш, 1974. – 48 с.

Статья поступила 30.03.2004